

Αρχιτεκτονική ακουστική προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις, αρχιτεκτονική και ακουστική ανάλυση της αίθουσας “Raphael Hall” Αμερικανικού Κολεγίου Ανατόλια

Γεώργιος Α. Χατζηγεωργίου , Στέλιος Θ. Κουζελέας

Περίληψη

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης αφορά στον ακουστικό σχεδιασμό, στις ακουστικές μετρήσεις και στην ακουστική προσομοίωση, με αναφορές στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, της νέας αίθουσας μουσικής και εκδηλώσεων “Raphael Hall” του Αμερικανικού κολεγίου Ανατόλια της Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για ένα παλαιό κτιριακό συγκρότημα, το οποίο με κατάλληλες διαρρυθμίσεις και την προσθήκη δύο νέων όγκων (σκηνή, είσοδος-φουαγιέ-χώροι υγιεινής) μετασχηματίστηκε σε μία σύγχρονη αίθουσα μουσικής και παραστάσεων, που στεγάζει εκδηλώσεις λόγου, μουσικής, θεάτρου, κινηματογράφου, κλπ.

Στην εν λόγω εργασία εξετάζεται η μεταβολή των ακουστικών αποτελεσμάτων συγκρίνοντας ακουστικές μετρήσεις με υπολογισμούς ακουστικών προσομοιώσεων του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα αρχιτεκτονικά στοιχεία και ακουστικές παραμέτρους. Ειδικότερα στη μελέτη αναλύονται, μεταξύ άλλων, ο υπολογισμός διαφόρων ακουστικών παραμέτρων με κύριο το χρόνο αντήχησης (RT60), με τη βοήθεια ακουστικών προγραμμάτων προσομοίωσης (CATT-Acoustic, CAD-Acoustic), η σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογισμού με τις αντίστοιχες ακουστικές μετρήσεις καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των λογισμικών μεταξύ τους. Παράλληλα στην έρευνα γίνονται σημαντικές αναφορές στις οπτικές χαράξεις της αίθουσας, στο βασικό εξοπλισμό του προσκηνίου της σκηνης και των παρασκηνίων, καθώς και στον τεχνολογικό εξοπλισμό αυτών.

Τέλος με την βοήθεια ειδικού λογισμικού ακουστικής προσομοίωσης («CAD-Acoustic») που αναπτύχθηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής, παρουσιάζεται η γεωμετρική προσομοίωση της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας (χάραξη ακουστικών ακτινών, προσομοίωση ηχοαπορροφητικών-ανακλαστικών επιφανειών, κλπ.)

«ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ : » Αρχιτεκτονική ακουστική, Ακουστική προσομοίωση, Μοντελοποίηση

Abstract

The subject of the current study, concerns the acoustic design, the acoustic measurements and the acoustic modeling, with reference to the architectural design of the new hall for music and speech “Raphael Hall” of Anatolia College of Thessaloniki. It concerns an old pile that its main use was for student gatherings, speech appearances, music shows and theatrical performances.

The current study investigates the variation of the acoustic results comparing the acoustic measurements with computation results of the room, taking notice of architectural elements and acoustic parameters. Specifically the study analyzes the acoustical parameters with the most important one the reverberation time (RT60), with the use of two different acoustic software CATT-Acoustic, CAD-Acoustic), the comparison of the results with corresponding measurements and finally the comparison of the results between the two software. Parallel with the current study, there are some important references about the optic lining of the room and the basic technological equipment of the upstage of the hall.

Finally with the use of «CAD-Acoustic» that was developed during a PhD research, a demonstration is carried out about the geometrical simulation of the acoustic behaviour of the room (acoustic ray tracing, simulation of sound absorptive-reflective surfaces, etc)

«KEY WORDS : » Architectural acoustics, Acoustic simulation, modelling

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης αφορά στον ακουστικό σχεδιασμό, στις ακουστικές μετρήσεις και στην ακουστική προσομοίωση, με αναφορές στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, της νέας αίθουσας μουσικής και εκδηλώσεων “Raphael Hall” του Αμερικανικού κολεγίου Ανατόλια της

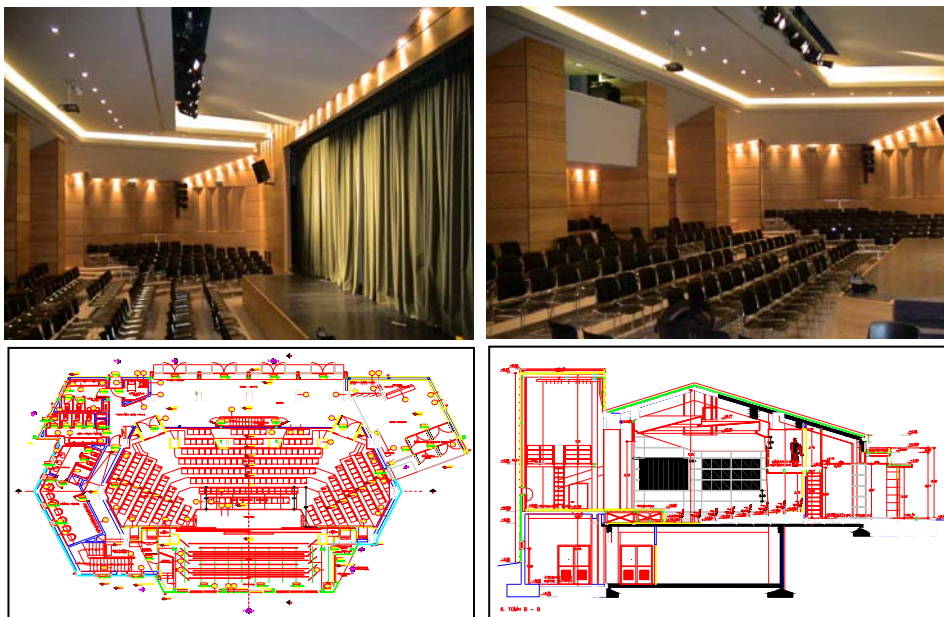
Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για παλαιό κτιριακό συγκρότημα με κύρια χρήση τη συνάθροιση σπουδαστών για εκδηλώσεις λόγου, μουσικές εκδηλώσεις, θεατρικές παραστάσεις.

Το κτίριο και η νέα αίθουσα “Raphael Hall” σχεδιάστηκε από το αρχιτεκτονικό γραφείο Π.Μακρίδης+Συνεργάτες (εικόνα 1). Η οπτικοακουστική μελέτη καθώς και η μελέτη τεχνικής σκηνης έγινε από την μελετητικό τμήμα της τεχνικής εταιρίας THANOS-TECH. Η ανακατασκευή του κτιρίου έγινε από την τεχνική εταιρία ARCON Construction ενώ το ακουστικό κέλυφος (ηχομόνωση-ακουστική), οι μηχανισμοί σκηνης και τα οπτικοακουστικά της αίθουσας κατασκευάστηκαν από την εταιρία THANOS-TECH.

Στη συγκεκριμένη έρευνα αναλύονται οι ακουστικές μετρήσεις της αίθουσας, συγκρίνονται τα αποτελέσματά με ακουστικά αποτελέσματα μοντέλων της αίθουσας με τη χρήση δύο ακουστικών λογισμικών (CATT-Acoustic, CAD-Acoustic). Ο σκοπός και η συμβολή της εργασίας δεν είναι μόνο η παρουσίαση και η σύγκριση των ακουστικών αποτελεσμάτων της αίθουσας με αυτών των ακουστικών λογισμικών προς εξακρίβωση και βελτιστοποίηση της σωστής ακουστικής λειτουργίας αίθουσας και μοντέλου, αλλά κυρίως η ανάλυση της χρήσης και της τοποθέτησης αρχιτεκτονικών στοιχείων και υλικών σε σχέση με την ακουστική ποιότητα της αίθουσας.

2.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ

Η χωρητικότητα της αίθουσας ποικίλει ανάλογα με την χρήση, με σκοπό την πιο ικανοποιητική οπτική χάραξη. Συγκεκριμένα ο ελάχιστος αριθμός είναι 221 θεατές για κινηματογραφική χρήση και μέγιστο αριθμό 300 θεατές για εκδήλωση συνεδρίου. Ο όγκος της αίθουσας είναι περίπου 960m^3 , το μήκος της είναι 10m και το πλάτος της 23m (εικόνα 1).



Εικ. 1: Απόψεις και αρχιτεκτονικά σχέδια της αίθουσας Ανατόλια

Το περιμετρικό ακουστικό κέλυφος της αίθουσας (κατακόρυφες επενδύσεις και μπούκα σκηνης) είναι κατασκευασμένο από συμπαγή και διάτρητα (19%) φύλλα MDF πάχους 8mm με επένδυση καπλαμά δρυός και υπόστρωμα πετροβάμβακα. Οι δύο κύριοι ανακλαστήρες που βρίσκονται πάνω από την περιοχή του προσκηνίου και την περιοχή των θεατών είναι κατασκευασμένοι από συμπαγή φύλλο γυψοσανίδας ενώ ο τρίτος που τερματίζει στην πλάτη της αίθουσας είναι διάτρητη γυψοσανίδα (15.5%) με υπόστρωμα πετροβάμβακα.

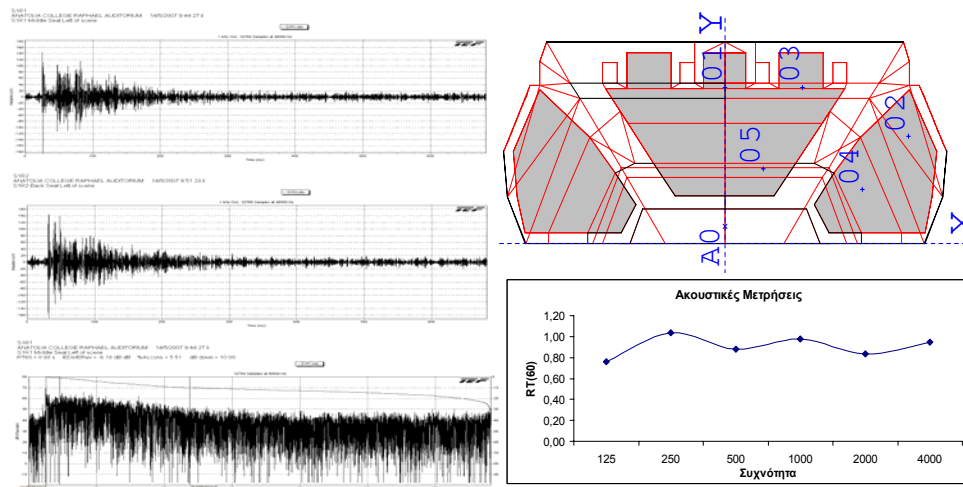
Το δάπεδο των θεατών είναι λινόλιο πάνω σε μπετόν ενώ η σκηνή και το προσκήνιο κατασκευάστηκαν πάνω σε μεταλλικό σκελετό επί αντικραδασμικών εδράσεων και πετροβάμβακα, με την τελική επιφάνεια να αποτελείται από δύο επάλληλες στρώσεις MDF και ξύλινο δάπεδο ραμποτέ.

Στη σκηνή της αίθουσας εγκαταστάθηκε κατάλληλος τεχνολογικός εξοπλισμός ηλεκτροκίνητων αυτοματοποιημένων μηχανισμών ώστε να υποστηρίζεται τεχνικά η σκηνοθεσία όλων των χρήσεων του χώρου. Ο εξοπλισμός αυτός αποτελείται από επτά (7) ηλεκτροκίνητους μηχανισμούς σταγγωνιών εκ των οποίων ένας (1) χρησιμοποιήθηκε για την ανάρτηση ανακλαστήρα σκηνής θεάτρου, δύο (2) φωτιστικά σταγγόνια για τον φωτισμό της σκηνής, τρία (3) σταγγόνια σκηνικών τα οποία ικανοποιούν παραστάσεις τριών πράξεων και ένα (1) φωτιστικό σταγγόνι στην περιοχή των θεατών. Τέλος εγκαταστάθηκαν οι χειροκίνητοι μηχανισμοί της κεντρικής αυλαίας και του οριζώντιου αρλεκίνου οι οποίοι με τα υφασμάτινα πετάσματά τους αποτελούν κυρίαρχο διακοσμητικό στοιχείο της αίθουσας.

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ακουστική μέτρηση του αμφιθεάτρου πραγματοποιήθηκε στις 14/05/2007 με την χρήση προσωπικού φορητού υπολογιστή και το TEF25 USB Preamp, πολυκατευθυντικό πυκνωτικό μικρόφωνο τύπου TEF04(tm) 1/2", πολυκατευθυντικό ηχείο δωδεκάεδρο τύπου (Υδραμα) και ενισχυτή τύπου (Type: Υδραμα 250Watt). Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε πέντε διαφορετικές θέσεις της αίθουσας (εικόνα 2) ενώ οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών παρουσιάζονται σε επόμενο πίνακα. Η πολυκατευθυντική πηγή (A0) (εικόνα 2) έχει ύψος 1,5m και το μικρόφωνο 1,2m κατευθυνόμενο προς την πηγή ενώ η ελάχιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι 4m.

Τα ακόλουθα σχήματα κρουστικών αποκρίσεων (εικόνα 2) υποδηλώνουν την παρουσία κάποιων πρώιμων ευεργετικών ανακλάσεων στα 40-80 msec για το δέκτη R1 και 30msec-80msec για το δέκτη R2, χρονικό διάστημα σημαντικό για την ευκρίνεια της ομιλίας στον χώρο καθώς και την διαύγεια της μουσικής.



Εικ. 2: Impulse response ακουστικών μετρήσεων στα 1KHz (αριστερά). Τοποθετήσεις μικροφώνων (επάνω δεξιά) και αποτελέσματα μέτρησης χρόνου αντήχησης RT60 (κάτω αριστερά)

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα πρέπει να εξεταστεί και η παρουσία των δευτερευουσών ανακλάσεων δηλαδή μετά τα πρώτα 80msec. Από τα αποτελέσματα των κρουστικών αποκρίσεων παρατηρούμε ότι μέχρι τα 200msec φθίνουν σχετικά σύντομα και με σταθερή κλίση. Η πλάτη και ο τελευταίος ακουστικός ανακλαστήρας της αίθουσας όπως προαναφέραμε στην εισαγωγή είναι κατασκευασμένη από διάτρητα ακουστικά panels και από διάτρητη γυψοσανίδα αντίστοιχα. Το μήκος της αίθουσας είναι σχετικά μικρό (10m) με αποτέλεσμα οι δευτερεύουσες ανακλάσεις σε ανάλογες περιπτώσεις να παραμένουν αρκετά δυνατές σε ένταση και σε πολλές περιπτώσεις να φτάνουν σε λάθος χρόνο, ειδικά όταν οι συνθήκες ακρόασης είναι ευπαθείς για διακοπή. Βέβαια στην συγκεκριμένη περίπτωση όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα των κρουστικών αποκρίσεων οι ευδιάκριτες δευτερεύουσες ανακλάσεις έχουν εξαλειφθεί με την χρήση των ανωτέρω απορροφητών.

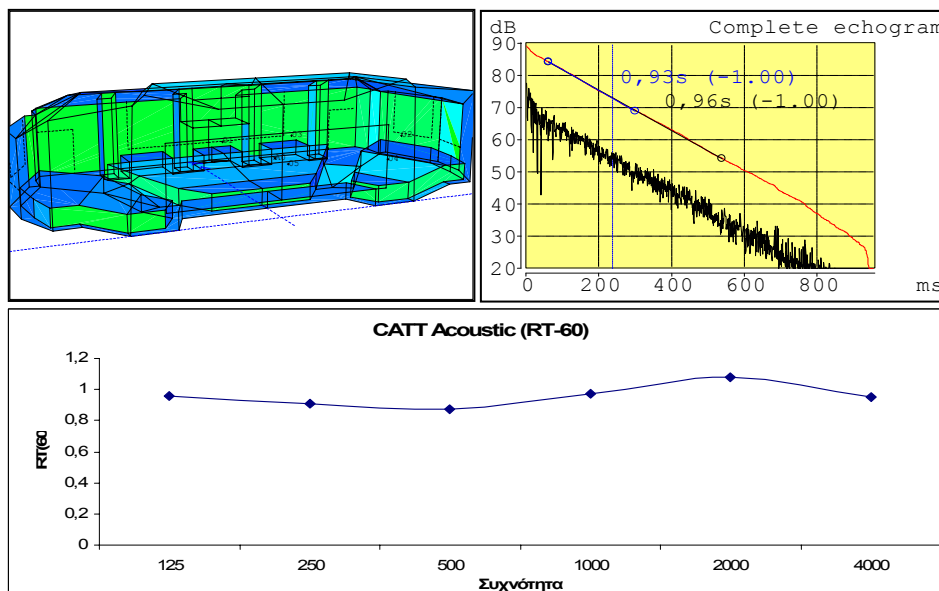
Τέλος τα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης φαίνεται ότι κυμαίνονται από 0.76-1.03sec (εικόνα 2). Είναι αξιοσημείωτο να προσέξουμε πως στην πιο χαμηλή οκταβική συχνότητα των 125Hz, ο χρόνος αντήχησης παρουσιάζει και την χαμηλότερη τιμή των αποτελεσμάτων. Η εξήγηση που θα μπορούσε να δοθεί είναι ότι ειδικά η διάτρητη γυψοσανίδα στην περιοχή του τελευταίου ανακλαστήρα σε συνάρτηση βέβαια και με το διάτρητο πάνελ στην πλάτη του αμφιθεάτρου, είναι σε απόσταση από το σταθερό ταβάνι 2.80m και με δύο στρώσεις πετροβάμβακα των 40mm, γεγονός που δημιουργεί απορρόφηση και συστονισμούς ακόμα και σε πολύ χαμηλές συχνότητες. Τέλος οι υπόλοιπες τιμές του χρόνου αντήχησης είναι σταθερές σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων 125-4000Hz.

4. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ

Για την εύρεση αντικειμενικών κριτηρίων και την ακουστική γεωμετρική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο εφαρμογές με σκοπό τη σύγκριση την ανάλυση και την εν δυνάμει βελτιστοποίηση των ακουστικών αποτελεσμάτων. Η πρώτη εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό αντικειμενικών κριτηρίων και ακουστικής προσομοίωσης είναι το “CATT Acoustic” ενώ η δεύτερη εφαρμογή ακούει στο όνομα “CAD Acoustic” και χρησιμοποιήθηκε για εφαρμογές γεωμετρικής αρχιτεκτονικής ακουστικής προσομοίωσης

4.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – “CATT-ACOUSTIC”

Σαν πρώτο βήμα ήταν να γίνει η μοντελοποίηση της αίθουσας με τον καθορισμό ενός συστήματος συντεταγμένων για όλες τις γωνίες του αμφιθεάτρου. Κάθε γωνία έπρεπε να οριστεί από τρεις διαστάσεις στο χώρο x,y,z με σκοπό τέσσερις τουλάχιστον γωνίες να ορίζουν μια επιφάνεια π.χ. ταβάνι, δάπεδο, τοίχους κ.τ.λ. Για κάθε επιφάνεια ορίστηκαν συντελεστές απορρόφησης και διάχυσης και τέλος ορίστηκαν οι θέσεις της ηχητικής πηγής (AN) και δεκτών (RN) ίδιες με τις πραγματικές κατά την διάρκεια των μετρήσεων (CATT-Acoustic, 2008). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 300 σημεία και 152 επιφάνειες (εικόνα 3).



Εικ. 3: Μοντέλο αίθουσας στο CATT-Acoustic (αριστερά), Ηχόγραμμα αίθουσας (δεξιά)

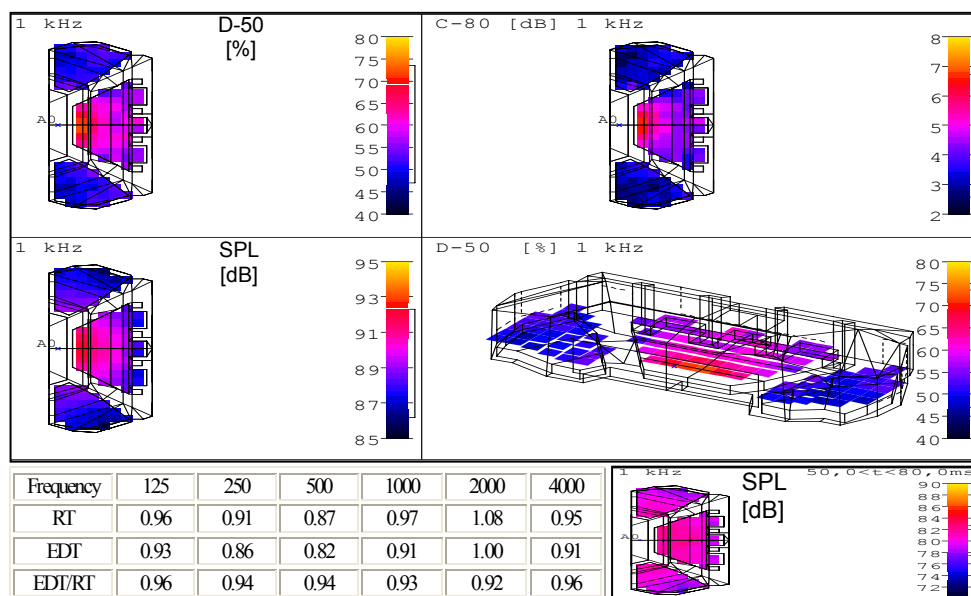
Το CATT-Acoustic δίνει την δυνατότητα να εξεταστούν μέσω διαγραμμάτων, η κρουστική απόκριση του χώρου και ο χρόνος αντήχησης (ο οποίος αναλύεται στη συνέχεια) (εικόνα 3), η ακουστική ευκρίνεια (D-50), η διαύγεια (C-80) και η στάθμη έντασης ήχου συναρτήσει του χρόνου (εικόνα 4).

Η χρήση της αίθουσας είναι κατά κύριο λόγο για μουσικές εκδηλώσεις και μουσικές παραστάσεις. Το CATT-Acoustic έδωσε χρόνους αντήχησης μέσα στα πλαίσια αρχών του

ακουστικού σχεδιασμού δηλαδή από 0.9sec-1.1sec (Cavanaugh, 1998). Το μεγάλο βάρος δίνεται στα αποτελέσματα των χαμηλών συχνοτήτων (125-250 Hz) όπου ο χρόνος είναι από 0.96-0.91sec και θεωρείται πολύ ικανοποιητικός. Στις μέσες και υψηλές συχνότητες έχουμε παρόμοιες τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 0.87-0.95 sec με την μεγαλύτερη αύξηση στα 2kHz με χρόνο αντήχησης 1.08sec.

Επίσης οι τιμές του πρώιμου χρόνου αντήχησης (Early Decay Time) συμπίπτουν σχεδόν με τις τιμές του χρόνου αντήχησης (εικόνα 4). Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι και ο “EDT είναι εξίσου σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση της καταληπτότητας ο οποίος εξαρτάται βέβαια από τις σχετικές θέσεις πηγής και ακροατή αλλά και από την κατευθυντικότητα της πηγής” (Ευθυμιάτος, 2004). Το γεγονός ότι ο λόγος του χρόνου αντήχησης RT60 και του πρώιμου χρόνου αντήχησης EDT τείνει κοντά στην μονάδα αποδεικνύει την ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και έχει σαν συνέπεια την καθαρότητα της ομιλίας (Barron, 1997).

Εξετάζοντας την κατανομή στάθμης πίεσης συναρτήσει του χρόνου και ειδικά μεταξύ 50-80msec βλέπουμε ότι υπάρχει μία ομοιόμορφη κατανομή έντασης ήχου. Σημαντικό είναι επίσης να αναφέρουμε την έλλειψη δυσάρεστων ακουστικών φαινομένων όπως φαινόμενα χρωματισμών και πολλαπλής ηχούς (εικόνα 4).



Εικ. 4: Χαρτογραφήσεις ακουστικών αποτελεσμάτων CATT-Acoustic (D50-C80-SPL-RT60-EDT)

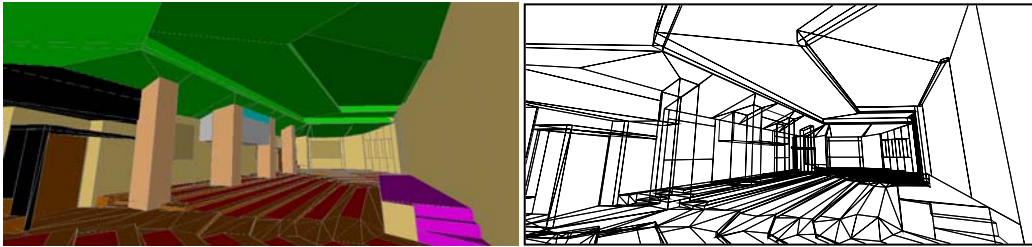
4.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – “CAD-ACOUSTIC”

Το λογισμικό “CAD Acoustic” είναι πρόγραμμα ακουστικής γεωμετρικής προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής (Κουζελέας, 2002) και λειτουργεί σε περιβάλλον AutoCAD. Παρέχει τη δυνατότητα πολύπλοκης 3Δ μοντελοποίησης και ταυτόχρονης ακουστικής προσομοίωσης αιθουσών με στατιστικές, γεωμετρικές και άλλου είδους προσομοιώσεις και υπολογισμούς (πχ. παιδαγωγική προσέγγιση λειτουργίας ακουστικής, αρχιτεκτονική μετάφραση ακουστικών αποτελεσμάτων, μεθοδολογία μοντελοποίησης για ακουστική προσομοίωση, κλπ) (Κουζελέας, 2004). Έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον AutoCAD με τη βοήθεια των γλωσσών VisualLISP, DCL και Visual BASIC (VBA).

Το επεξεργασμένο τελικό απλοποιημένο μοντέλο της αίθουσας Ανατόλια το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ακουστική προσομοίωση με το λογισμικό CAD-Acoustic υλοποιήθηκε σε περιβάλλον “AutoCAD Architecture 2008” και βασίστηκε σε προϋπάρχοντα λεπτομερή αρχιτεκτονικά σχέδια του ανωτέρω αρχιτεκτονικού γραφείου που έκανε την μελέτη (εικόνα 1). Το μοντέλο σχεδιάστηκε με συγκεκριμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης προς ακουστική προσομοίωση (Κουζελέας, 2004). Το μοντέλο έχει όγκο 963 μ3 περίπου με

κλειστή τη σκηνή και αποτελείται από 1061 επίπεδες τριγωνικές επιφάνειες συνολικού εμβαδού 824 μ² (εικόνα 5).

No Υλικού	Υλικό	Θέση	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
No 1	Διάτρητη γυψοσανίδα (gips)	Πλαϊνοί ανακλαστήρες οροφής (πίσω τοίχοι)	0,69	0,74	0,77	0,76	0,59	0,31
No 2	Γυψοσανίδα πετροβάμβακα	Ανακλαστήρες οροφής (ενδιάμεσοι, σκηνής), Δωμάτιο ελέγχου, Γύψινοι τοίχοι εισόδου	0,01	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01
No 3	Βελούδινες κουρτίνες (μέτριο 50%)	Άνοιγμα δωματίου ελέγχου	0,05	0,25	0,4	0,5	0,6	0,5
No 4	Μουσαμάς δαπέδου σε μπτεόν	Δάπεδο ακροατηρίου	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
No 5	Λεπτά άδεια καθίσματα (πλαστικό-δέρμα)	Καθίσματα κοινού	0,4	0,5	0,58	0,61	0,58	0,5
No 6	Καθισμένο κοινό	Επιφάνεια "μπούκας" σκηνής	0,6	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
No 7	Κόντρα πλακέ δρυς ανακλαστικός	Περιμετρικοί τοίχοι, κολόνες	0,23	0,08	0,07	0,03	0,01	0,01
No 8	Ξύλινο δρύινο απορροφητικό διάτρητο	Μέρη περιμετρικών τοίχων	0,7	1,25	1,23	1,01	0,66	0,42
No 9	Διπλή ξύλινη ακουστική πόρτα	Πόρτες	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57
No 10	Ξύλινο δάπεδο πάνω σε δοκάρια	Προσκήνιο	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07



Εικ. 5: Μοντέλο αίθουσας Ανατόλια : Θέση και συντελεστές απορρόφησης υλικών (επάνω), φωτορεαλιστική και «γραμμωτή» άποψη αίθουσας (AutoCAD) (κάτω)

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της ακουστικής μελέτης καθώς και η προσαρμογή των συντελεστών απορρόφησης Sabine στις επιφάνειες του μοντέλου περιγράφονται με λεπτομέρεια ανωτέρω (εικόνα 5).

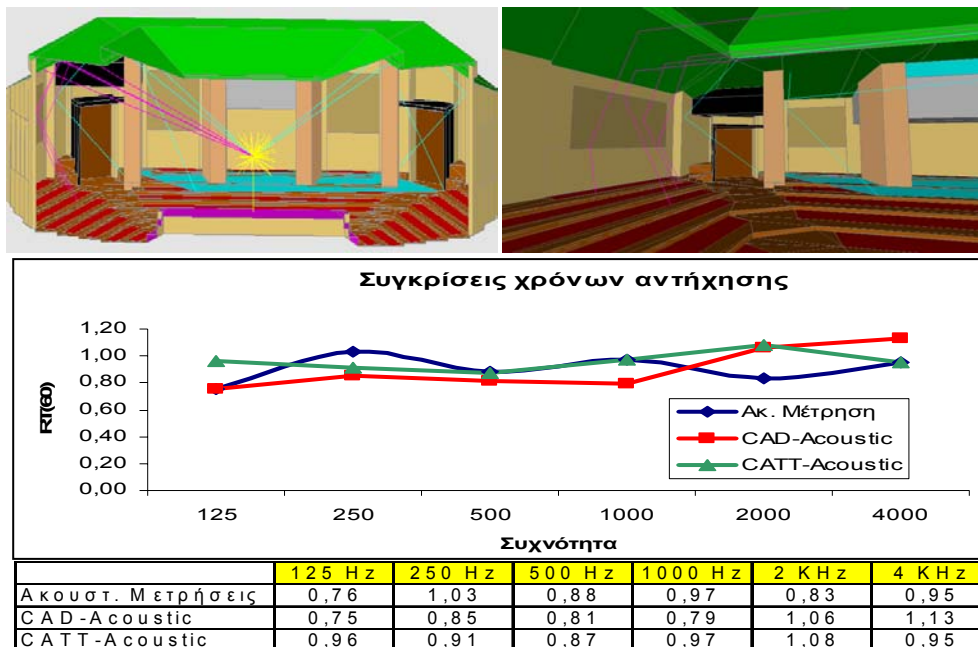
Με τη βοήθεια του « CAD-Acoustic » προσομοιώθηκε τρισδιάστατα αριθμός αντανάκλασεων ηχητικών ακτίνων από πηγή ήχου της σκηνής προς επιλεγμένες επιφάνειες με σκοπό αφενός τον ακριβή έλεγχο της σωστής τοποθέτησης ανακλαστήρων σε σχέση με το επιθυμητό ακουστικό αποτέλεσμα και αφετέρου τη «βελτιστοποίηση» της κατεύθυνσης ανακλαστήρων καθώς και την εύρεση «ιδανικών θέσεων και διαδρομών» των ηχητικών πηγών. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση (εικόνα 6) παρατηρούμε (αριστερά εικόνας) ότι τη θέση των ανακλαστήρων (με πράσινο χρώμα) είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει τη μεταφορά άμεσου ήχου (direct sound) και την αποφυγή ενδεχόμενης ηχούς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της τοποθέτησης απορροφητικών υλικών στους πίσω τοίχους, δεδομένου ότι η ηχώ θα μπορούσε να δημιουργηθεί στα πίσω και πλαϊνά καθίσματα (μπλέ επιφάνεια στους πίσω τοίχους). Στο δεξιό μέρος της ίδιας εικόνας, με τη κατάλληλη γεωμετρική απεικόνιση ακουστικών ακτίνων ελέγχουμε ή παρατηρούμε την απαραίτητη τοποθέτηση απορροφητικών υλικών (ξύλινων δρύινων διάτρητων) στους πίσω πλαϊνούς τοίχους με σκοπό την αποφυγή ηχούς στις τρεις πίσω θέσεις καθισμάτων όπως προκύπτει από τη προσομοίωση.

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ RT60

Σε μια πρώτη ανάλυση παρατηρούμε ότι οι χρόνοι αντήχησης των λογισμικών δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από αυτών των ακουστικών μετρήσεων (εικόνα 6). Η μοναδική σχετική απόκλιση των αποτελεσμάτων των λογισμικών σε σχέση τις μετρήσεις παρουσιάζεται στα 2KHz όπου η απόκλιση φτάνει στο 0,20 περίπου αφού τα δύο λογισμικά συμπίπτουν (1,06 και 1,08 αντίστοιχα) ενώ οι μετρήσεις παρουσιάζουν τιμή 0,83. Η μερική απόκλιση ίσως να οφείλεται στο γεγονός της προσαρμογής των συντελεστών απορρόφησης στα λογισμικά. Για παράδειγμα στην επιφάνεια του κλεισίματος της σκηνής («μπούκα») αποδόθηκαν συντελεστές απορρόφησης όμοιοι με αυτούς καθισμένου κοινού (εικόνα 6) δεδομένου ότι η ακουστικές ενέργειες της αίθουσας και του εσωτερικού της σκηνής δεν διαφέρουν σημαντικά (Barron, 1993). Αυτό επέτρεψε να γίνουν συγκρίσιμα τα αποτελέσματα δεδομένου ότι οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν με ανοιχτή τη σκηνή ενώ τα ακουστικά αποτελέσματα των μοντέλων στηρίχθηκαν σε μοντέλα με κλειστό το εσωτερικό της σκηνής. Κάτι αντίστοιχο έγινε και με το άνοιγμα του δωματίου ελέγχου προσδίδοντας ένα απορροφητικό υλικό (εικόνα 5).

Το CATT-Acoustic έδωσε χρόνους αντήχησης πολύ ικανοποιητικούς σε σχέση με τον όγκο της αίθουσας και την χρήση αυτής (Lamoral, 1975). Στην παρακάτω γραφική παράσταση βλέπουμε τα αποτελέσματα σε φάσμα συχνοτήτων από 125-4000Hz. Συγκεκριμένα στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων (125-250Hz) όπου οι περισσότεροι χώροι παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα συντονισμού, λόγω δυσκολίας στην κατασκευή απορροφητών χαμηλών συχνοτήτων, τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά αφού οι τιμές είναι 0,96 και 0,91sec. Βέβαια σε αίθουσες που χρησιμοποιούνται για κλασική μουσική, η ανύψωση των μπάσων κατά 50% δίνει μια αίσθηση ζεστασιάς στον ακροατή (Barron, 1993). Στις υπόλοιπες συχνότητες οι χρόνοι αντήχησης παραμένουν σταθεροί (0,87-0,97) με την μεγαλύτερη τιμή 1,08sec στα 4000Hz.

Το CAD-Acoustic έδωσε ικανοποιητικούς χρόνους αντήχησης σε σχέση με αυτούς των ακουστικών μετρήσεων και ειδικότερα στις μεσαίες συχνότητες (500-1KHz). Η σχετική απόκλιση στις υψηλές συχνότητες και ειδικότερα στα 4KHz ίσως να οφείλεται στην στατιστική και όχι στη "ray tracing" εφαρμογή, από πλευράς λογισμικού, του Νόμου του Sabine (Cremer & Muller & Schultz, 1982) λαμβάνοντας εξίσου υπόψη στην εμβαδομέτρηση επιφάνειες υλικών με λιγότερη συμβολή στις άμεσες ανακλάσεις ή απορροφήσεις ακουστικής ενέργειας.



Εικ. 6: Γεωμετρική ακουστική προσομοίωση ηχητικών ακτίνων (CAD-Acoustic) και συγκρίσεις χρόνων αντήχησης ακουστικών μετρήσεων αίθουσας με λογισμικά.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν την πολύ καλή ακουστική της αίθουσας Raphael Hall. Οι κρουστικές αποκρίσεις επιβεβαιώνουν επίσης την ύπαρξη διάχυτου πεδίου στο χώρο καθώς και την σημαντική συνεισφορά των πρώιμων και δευτερευουσών ανακλάσεων για την καθαρή ομιλία και την διαύγεια της μουσικής. Η χρήση των λογισμικών CATT-Acoustic και CAD-Acoustic αποδείχτηκαν χρήσιμα εργαλεία για την μελέτη ακουστικών παραμέτρων.

Με τη βοήθεια του CATT-Acoustic δόθηκε η δυνατότητα σύγκρισης και ανάλυσης των τιμών του πρώιμου χρόνου αντήχησης (Early Decay Time) με αυτές του χρόνου αντήχησης, η εξακρίβωση της κατανομής ακουστικής ενέργειας μέσω ειδικών χαρτογραφήσεων (mapping) που επιτρέπουν την ενδεχόμενη διαδραστική ακουστική παρέμβαση και έλεγχο δυσάρεστων ακουστικών φαινομένων όπως φαινόμενα χρωματισμών και πολλαπλής ηχούς.

Με τη βοήθεια του CAD-Acoustic και μέσω γεωμετρικών ακουστικών προσομοιώσεων ελέγχθηκε η σωστή τοποθέτηση ανακλαστήρων σε σχέση με την επιθυμητή κατεύθυνσή της

ακουστικής ενέργειας καθώς επίσης η διαδραστική εύρεση των «ιδανικών θέσεων και διαδρομών» των ηχητικών πηγών. Παράλληλα με τον υπολογισμό ακουστικών κριτηρίων όπως ο χρόνος αντήχησης RT60, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός διαφόρων άλλων στατιστικών παραμέτρων σχετικά με την εμβαδομέτρηση επιφανειών των υλικών, τη κατανομή τη τοποθέτηση και το % ποσοστό των υλικών (στατιστικά στοιχεία τα οποία δεν εμφανίζονται στην εργασία λόγω πληθώρας πληροφοριών αλλά παρουσιάζονται στην προφορική ανακοίνωση του συνεδρίου). Τα εν λόγω στατιστικά στοιχεία συναρτήσε των χρησιμων ακουστικών γεωμετρικών προσομοιώσεων μέσω συστήματος CAD αποτελούν προσεγγίσεις ιδιαίτερα χρήσιμες για την αρχιτεκτονική, ακουστική διευθέτηση και ανάλυση του χώρου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον κ. Π. Καραμπατζάκη για την παραχώρηση του CATT-Acoustic.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barron, M. (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Chapman & Hall, London

Barron, M. (1997). 21 years of Acoustic Scale Modeling Testing. Proceedings of Institute of Acoustics, Vol.19:Part3, Published by IOA, 67-80

Cavanaugh, W. (1998). *Architectural Acoustics Principles and Practice*. John Wiley & Sons Inc, NY

Catt-Acoustic (2008). Catt Company info. Format World Wide Web : <http://www.catt.se/CATT-Acoustic.htm>

Cremer, L. & Muller, H. & Schultz, T. (1982). Principles and Applications of Room Acoustics. Volume 1, Applied Science Publishers

Ευθυμιάτος, Δ. (2004). Μερικές παρατηρήσεις για την σχέση αντήχησης - ευκρίνειας. Εφαρμογή σε χώρους αυξημένης αντήχησης. Ακουστική 2004, 13-18.

Kouzeleas, S. (2002). Développement d'un outil d'aide en simulation acoustique architecturale adaptable à un système de modélisation CAO. Διδακτορική διατριβή N° 2642, Πανεπιστήμιο Bordeaux 1, Γαλλία

Kouzeleas, S. (2004). Computational processes of a hall cad modelisation for acoustic simulation according to accepted geometry format via acoustic software. E. proceedings of the First International Conference "From Sscientific Computing to Computational Engineering" (1st IC-SCCE), 8-10 September 2004, Athens, Greece

Κουζελέας, Σ. (2004). Εφαρμογές ακουστικής και γεωμετρικής προσομοίωσης αίθουσας με τη βοήθεια πλατφόρμας ακουστικής προσομοίωσης προσαρμοσμένης σε σύστημα CAD. Πρακτικά συνεδρίου Ακουστική 2004, 375-382, Ελληνικό ΙΝστιτούτο Ακουστικής, Θεσσαλονίκη, 27-28 Σεπτεμβρίου 2004

Lamoral, R. (1975). *Acoustique et architecture*. Masson, Paris, 1975

Χατζηγεωργίου Γ. (2006). Ακουστική Προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του αμφιθεάτρου "Nelson Haden Auditorium" Πανεπιστημίου South Bank Λονδίνου. Πρακτικά συνεδρίου Ακουστική 2006, 113-120, Ελληνικό ΙΝστιτούτο Ακουστικής, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο Κρήτης, 18-19 Σεπτεμβρίου 2006

Γεώργιος Χατζηγεωργίου: Πολιτικός Μηχανικός, Μηχανικός Ακουστικής, B.Eng(*Hons*), MSc, Pg.Dip, Γρηγορίου Γέρμα 14, Θεσσαλονίκη, 54.638 – Τηλ. (+30) 693 7183131 – email: g.hatzigeorgiou@gmail.com

Στέλιος Θ. Κουζελέας : Αρχιτέκτων Μηχανικός Α.Π.Θ., Δόκτορας Πανεπιστημίου Bordeaux 1 Γαλλίας, Λέκτορας Αριστετελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικός Χωροταξίας και Ανάπτυξης – τηλ. (+30) 6938.736804 – email: stelios_kouzeleas@yahoo.fr